



Bu bir MMO yayınıdır

# DÜZLEMSEL ELEKTRO-PNÖMATİK MANİPÜLATÖR TASARIMI VE KONTROLÜ

Erol UYAR<sup>1</sup>

Mücahid CANDAN<sup>1</sup>

Ekrem YAVUZ<sup>1</sup>

Nail AKÇURA<sup>1</sup>

# DÜZLEMSEL ELEKTRO-PNÖMATİK MANİPÜLATÖR TASARIMI VE KONTROLÜ

Erol UYAR<sup>1</sup>, Mücahid CANDAN<sup>2</sup>, Ekrem YAVUZ<sup>3</sup>, Nail AKÇURA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
erol.uyar.deu@gmail.com

<sup>2</sup>Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
mucahidcandan@gmail.com

<sup>3</sup>Ege Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
ekremyavuz35@windowslive.com

<sup>4</sup>Ege Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü  
nailakcura@gmail.com

## ÖZET

Sunulan çalışmada silindirik koordinatlarda hareket yeteneğine sahip iki boyutlu düzlemsel yörünge takip edebilen elektro-pnömatik bir manipülatör tasarımı ve uygulaması tanıtılmıştır. Kartezyen manipülatörün açısal hareketi çift girişli pnömatik oransal bir valfin çalıştırdığı döner silindire sağlanmıştır. Manipülatörün uç kısmının doğrusal hareketi ise bir adım motora bağlı trigger kayış-kasnak mekanizması ile gerçekleştirilmiştir. Ana kontrolcü olarak kullanılan Bilgisayar ile oransal valf ve adım motor arasındaki iletişim protokolü Arduino mikro işlemci ile sağlanmıştır. Hassas bir pozisyonlama için gerek oransal valfin sürdüğü döner silindirin gerekse de adım motorun çizgisel hareketleri geri besleme ile izlenerek kontrol edilmiştir. Tasarımın model uygulaması ile yörünge takibinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikroişlemci, Kontrol, Elektro-pnömatik, Valf, Manipülatör.

## ABSTRACT

In the presented study, it is worked on design and application of an electro- pneumatic manipulator which is capable of moving along cylindrical coordinates and able to follow planar orbits. The angular movement of the manipulator is provided by cylindrical valve that is powered by double inlet proportional pneumatic valve. The linear movement of the end effector of the manipulator is provided by a trigger belt -pulley which is attached a stepper motor. The communication protocol between main

controller (computer) and proportional valve and stepper motor is provided with an Arduino microprocessor. For the precise positioning, linear movements of proportional valve and stepper motor are observed and controlled with feedback. Design and implementation of the model was obtained successful results of the follow orbits.

**Key Words:** Microcontroller; Control, Electro-pneumatic, Valve, Manipulator.

## 1. GİRİŞ

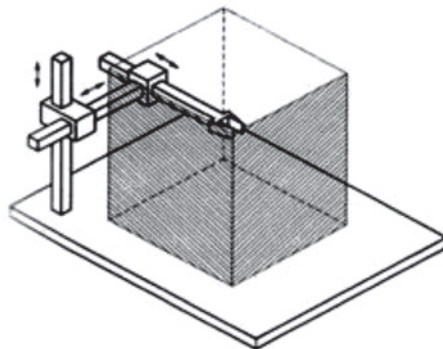
Günümüzde robot sistemlerin çok geniş kullanım alanları olduğundan tanımlanmalarında bazı ufak ayrıntılar önem kazanmıştır. Robot sistemlerin en yaygın kullanım alanlarından biri endüstri sahalarıdır. İngiliz Robot Birliği(BRA) ve Japon Endüstriyel Robot Birliği(JIRA) gibi ulusal robotik birliklerinin yayınladığı resmi robot tanımları, çoğunlukla endüstriyel robotların tanımıdır. Robot sistemlerin endüstri alanlarında kullanılmalarıyla ilgili olarak robot tanımı, Amerikan Robot Enstitüsü (RIA) tarafından şu şekilde yapılmıştır. “Robot, çeşitli görevleri yapmak maksadıyla değişik şekillerde programlanmış hareketlerle; nesnelerin, gereçlerin veya özel düzeneklerin taşınması için tasarlanmış çok işlevli bir mekanizmadır.” [1]

Robot sistemlerin genelde manipülatör olarak da adlandırılabilir mekanizması, uygun şekilde bir araya getirilen mekanik ve elektronik alt sistemlerin amaca uygun olarak kumanda edilmesi ile çalışır. Bir robot sistemin

tasarımında, istenilen hareketlerin kusursuz biçimde yerine getirilmesi, genelde bilgisayar destekli ölçme-kontrol üniteleri ve uygun programlama yazılımı ile mümkün olabilir. Bir mekanik yapı ya da eklemlerle birbirine bağlanmış sıralı rijit cisimlerden (uzuvlardan) oluşan manipülatörün hareket kabiliyeti serbestlik derecesi olarak tanımlanır. Eklemlerin yani manipülatör mekanizmasının hareketi, değişik tahrik elemanları ve sürücü sistemlerle mümkün olur. Manipülatörler çalışma uzaylarına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar.

## 2. MANİPÜLATÖRLER

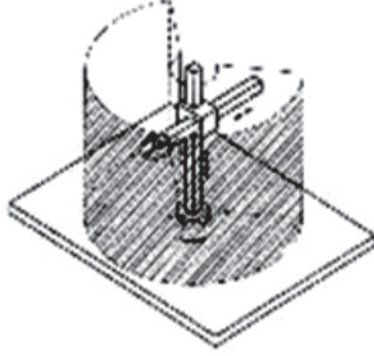
### 2.1. Kartezyen Manipülatörler



Şekil 1. Kartezyen manipülatör.

Bu tip bir manipülatör üç tane kayar tip eklem ile elde edilir. Mekanik yönden çok sağlamdır fakat çalışma uzayındaki hareket yeteneği bakımından zayıftır. Bu tip manipülatörler çok büyük boyutlarda ve ağırlıklarda nesnelere hareket ettirmek ve taşımak için idealdir. Kartezyen manipülatörlerde eklemleri hareket ettiren motorlar çoğunlukla elektrik bazen de pnömatik motorlardır.

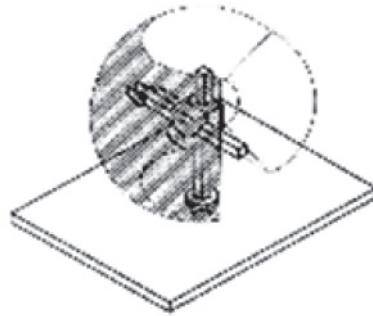
## 2.2. Silindirik Manipülatörler



Şekil 2. Silindirik manipülatör.

Bu tip bir manipülatör bir tane döner ve iki tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler de mekanik yönden sağlamdır fakat bilek konum doğruluğu yatay harekete bağlı olarak azalır. Benzer şekilde büyük boyutlu nesnelere taşınmasında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde hidrolik motorları tercih edilir.

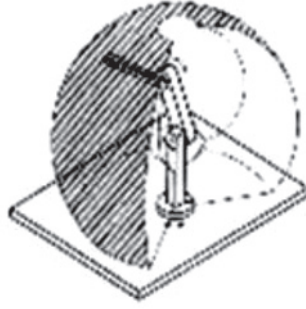
## 2.3. Küresel Manipülatörler



Şekil 3. Küresel manipülatör.

Bu tip bir manipülatör iki tane döner ve bir tane kayar tip eklem ile elde edilir. Bu tip manipülatörler mekanik yönden diğer iki tipten daha zayıf, mekanik yapı yönünden daha karmaşıktır. Çoğunlukla makine montajlarında kullanılırlar. Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.

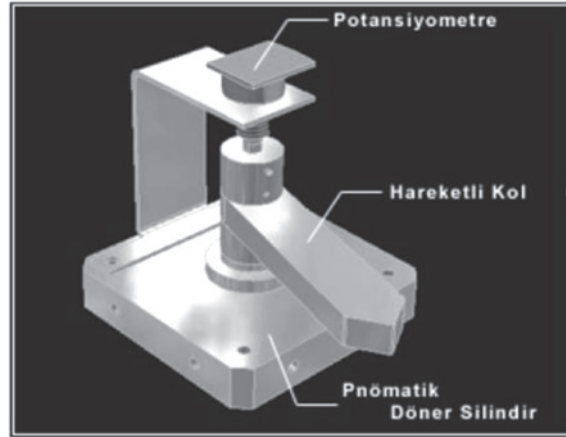
## 2.4. Eklemlili veya İnsan Kolu Manipülatörler



Şekil 4. Eklemlili veya insan kolu manipülatör.

İnsan kol yapısı esas alındığı için bu isim verilmiştir. Bu tip manipülatörler tüm eklemleri döner olduğundan çalışma uzaylarında en yetenekli manipülatörlerdir. Endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahiptirler (boyama, kaynak yapma, montaj, yüzey temizleme vb.). Bu tip manipülatörlerde elektrik motorları tercih edilir.

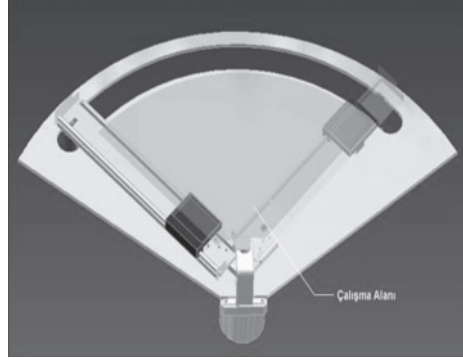
## 3. MANİPÜLATÖR VE KONTROLÜ



Şekil 5. Manipülatör prensip şeması.

Proje kapsamında tasarlanan manipülatör; pnömatik bir eleman olan döner silindirin sağladığı açısal hareketle bunun üzerine yerleştirilmiş olan ve doğrusal hareket eden bir trigger kayış-kasnak mekanizmasından oluşmaktadır. Döner silindir 5/3 yollu oransal bir valf ile hareket ettirilirken, doğrusal hareket trigger kasnağın bağlandığı bir adım motorla sağlanmaktadır. Bu hali ile manipülatör iki serbestlik dereceli, düzlemsel işlevlere uygun bir robot olarak çalışabilmektedir.

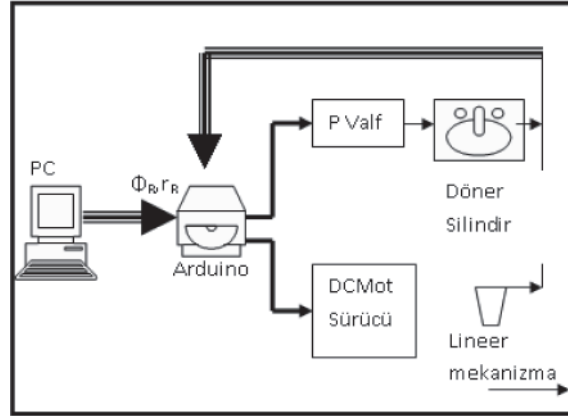
Manipülatörün açısal pozisyonunu ölçmek ve geri besleme ile kontrolünü sağlamak için enkoder görevi görmek üzere tek turlu bir potansiyometre kullanılmıştır.



Şekil 6. Çalışma alanı.

Potansiyometre ile döner silindirin milleri Şekil 5 ve Şekil 6'daki gibi eş eksenli hale getirilip sabitlendikten sonra potansiyometrenin orta ucundan alınan sinyal geri beslenerek döner pozisyon kontrolü için kullanılmıştır.

Trigger kasnak-kayış mekanizmasının doğrusal pozisyonu ise 12 Voltluk besleme gerilimi ile çalışan adım motorun adım sayılarının kontrolü ile sağlanmıştır.

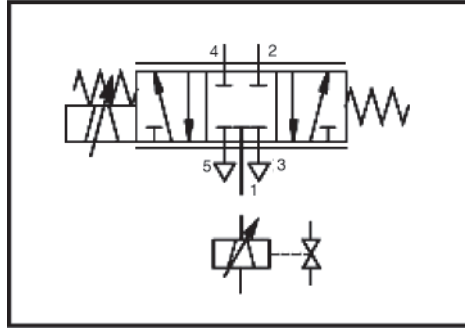


Şekil 7. Kontrol şeması.

### 3.1. Kontrol Devresi

Sistem kontrolü şematik olarak Şekil 7'de gösterilmiştir. Dönme ve doğrusal referans pozisyon değerleri Hiper-Terminal olarak çalışan PC'nin USB Portuna bağlı mikro işlemcide(Arduino), ilgili analog portlarından geri beslenen anlık değerlerle karşılaştırılmak üzere gönderilmektedir. Bu şekilde belirlenen hataya bağlı olarak, mikro işlemcinin analog çıkış portlarından kontrol yazılımına göre oransal valfe ve motor sürücüsüne gerekli PWM değerleri yollanarak manipülatörün uç kısmının istenen pozisyona gelmesi sağlanmaktadır. Devrede pozisyon kumandası pnömatik aktüatör olarak çalışan oransal valf ve döner silindirle sağlanmıştır.

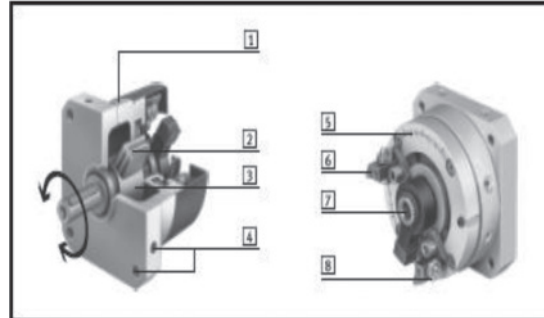
### 3.2. Oransal Valf Kontrolü



Şekil 8. Oransal valf.

Servo valfler ile aç-kapa valfler arasındaki boşluğu doldurmak için geliştirilen oransal valfler günümüzde pnömatik sistemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada “5/3-konumlu oransal valfi” (MPYE-5-1/8) kullanılmıştır.

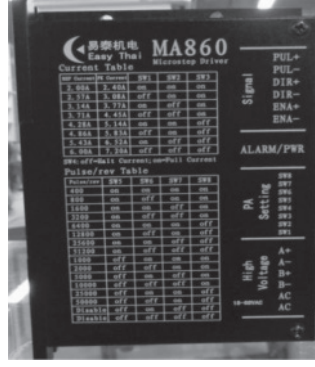
Bu valf, girişine verilen 0-10 V arasındaki gerilim değişimine karşılık kumanda ettiği “DSM 10” modeli pnömatik döner silindirin 0-270 derece arasında kademesiz olarak döndürmektedir. Pozisyon hatasına göre mikro işlemcinin PWM çıkışından 0-5V arasında üretilen sinyal Optokuplör ile sürülen bir transistörle 0-10. V seviyesine çevrilerek valfe kumanda edilmektedir. Oransal valf ve döner silindirin yapıları Şekil 8 ve Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. DSM 10 silindir.

### 3.3. Adım Motor Sürücü Devresi ve Kontrolü

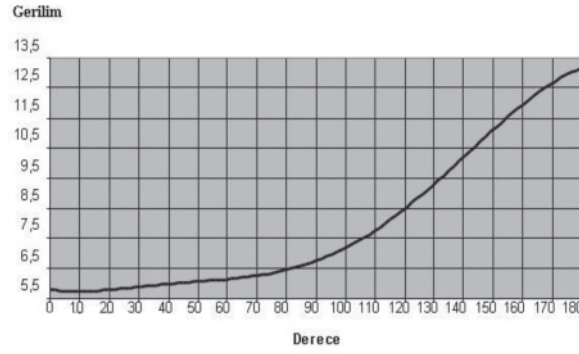
Doğrusal hareketi sağlayan adım motorun kontrolü mikroişlemci ve mikro step sürücü kartı ile sağlanmıştır. Mikroişlemciye aktarılan pozisyon geri besleme bilgileri, işlemci de değerlendirilerek bunun çıkış portlarından sürücü kartına yollanan PWM ve yön sinyalleri ile motorun doğrusal hareketinin kontrolü sağlanmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Mikrostep sürücü.

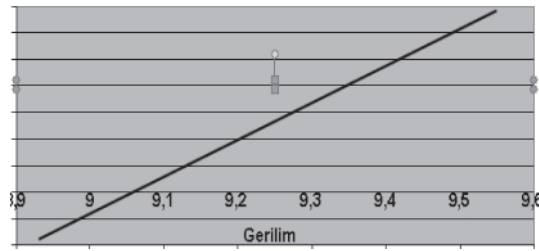
### 3.4. Potansiyometrenin Kalibrasyonu

Manipülâtörün çalışma alanı 90° olarak tasarlanmıştır. Şekil 11'deki potansiyometrenin gerilim–derece eğrisinden 90-170 derece aralığında lineere yakın bir karakteristiğe sahip olduğu görülmektedir. Bu bölgede doğrusallaştırılan karakteristiğe göre değerlendirilen gerilim (geri besleme) sinyali esas alınarak manipülâtör kolunun pozisyonu hesaplanabilmektedir



Şekil 11. Potansiyometre eğrisi.

$$y = 69,603x - 575,45$$



Şekil 12. Potansiyometrenin doğrusal çalışma bölgesi.



### 3.5. Çalışma Alanı ve Yörünge Takibi

Robotun çalışma alanını ve yörünge takibini belirlemek için kutupsal ve Kartezyen koordinatlarda hareket analizi incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak manipülatörün uç noktasının kutupsal  $r$  ve  $\theta$  ile  $(x,y)$  Kartezyen koordinatları arasındaki dönüşümü aşağıdaki ifadelerle belirtilmiştir:

$$x = r \cos\theta \quad (1)$$

$$y = r \sin\theta \quad (2)$$

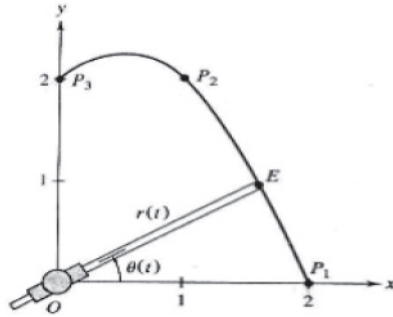
Bu iki formüle göre  $x$  ve  $y$  cinsinden elde edilen dönüşüm formülleri şöyle yazılabilir:

$$r = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan (y/x) \quad (4)$$

Tüm düzlemsel koordinat sistemlerinde olduğu gibi, kutupsal koordinat sisteminde de iki koordinat vardır:  $r$  (radyal koordinat ya da ışınsal koordinat) ve  $\theta$  (açısal koordinat) olarak tanımlanır. Koordinat başlangıcı (kutup)  $r=0$  ve  $\theta=0$  konumu ile belirtilen noktadır.

$r$  koordinatı, kutuptan olan ışınsal uzaklığı;  $\theta$  koordinatı ise noktanın üzerinde bulunduğu ışının,  $\theta=0^\circ$  ışınından saat yönünün tersi yönündeki açısını ifade eder.  $0^\circ$  ışını, Kartezyen koordinat sisteminde “pozitif  $x$  eksenini” olarak bilinir. Kutupsal sistemde açılar, genel olarak ya derece ya da radyan kullanılır.



Şekil 13. Yörünge takip eğrisi.

### 3.6. Yörünge Eğrisi

Uç noktasının istenilen bir eğriyi takip edebilmesi için önce Kartezyen koordinatlarda eğrinin  $y=f(x)$  şeklinde hareket denklemi yazılır. Buradaki manipülatöre uygunluğu açısından yörünge takibi için kutupsal koordinatlarda çalışmak daha uygun görülmüştür. Bu amaçla kutupsal koordinatlarda çizici ucun takip etmesi istenilen eğri denklemini

oluşturmak için uç noktanın yapması gereken hareket fonksiyonu çıkarılır. Uç noktanın hareket fonksiyonu açısal hareket yani döner silindirin hareket fonksiyonu ve doğrusal hareket yani DC motorun hareket fonksiyonu olarak bulunur. Yapılan ters kinematik analiz ile bu iki fonksiyon zamana bağlı değişim fonksiyonu yazılır. Böylece hareketin her anında uç noktanın açısal ve doğrusal olarak nerelerde bulunması gerektiği bulunur. Sonuç olarak; istenen bir eğrinin çizimi için mafsalların yapması gereken hareketin  $r$  ve  $\Theta$  koordinatlarındaki verileri elde edilmiştir. Bu veriler robotun anlık pozisyonuyla kontrol edilerek bilgisayar tarafından sürekli olarak yeni hata sinyalleri yaratılır.

#### 4. ÇALIŞMA ALANI SEÇİMİ VE YÖRÜNGE HESAPLANMASI

Tasarımı yapılan manipülatörün çalışma alanı silindirik koordinatlarda aşağıdaki gibi sınırlandırılmıştır. Şekil 6'da manipülatörün çalışma alanı görülmektedir. Çalışma alanı değerleri  $4,5 < r < 25$  [cm],  $0 < \Theta < 90^\circ$  olarak tasarlanmıştır.

Yörünge takibi için yukarıda da belirtildiği döner silindirin ve motorun eş zamanlı olarak sürülmesi gerekmektedir. Bu iki uzvun hareket denklemleri aşağıdaki örnek ile açıklanmaktadır.

##### 4.1. Örnek Eğri Denklemleri

Şekil 11'de yörünge olarak verilen  $y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$  şeklinde 2.dereceden bir eğrinin aşağıdaki noktalardan verilen koşulları sağlayacak şekilde geçmesi istensin. Verilen noktalar  $P_1(2,0)$ ,  $P_2(1,2)$ ,  $P_3(0,2)$ , belirtilen noktalardaki hızlar da  $v_1=0$ ,  $v_2=1.41\pi$ ,  $v_3=0$  olsun ve  $P_1$  noktasından  $P_3$  noktasına hareketin  $t=1$  sn de olması istensin. Bu şartlarla eğrinin  $a, b$  ve  $c$  katsayılarını bulalım:

$$0 = 4a + 2b + c \quad (5)$$

$$2 = a + b + c \quad (6)$$

$$2 = c \quad (7)$$

(5), (6) ve (7)'den  $a, b$  ve  $c$  çözülürse  $a = -1$ ,  $b = 1$  ve  $c = 2$  bulunur. Böylece polinom denklemi:

$$y = -x^2 + x + 2 = f(x) \quad 0 \leq x < 2 \quad (8)$$

şeklinde olur.

Polar koordinatlarda aşağıdaki ifadeler yazılarak eğrinin zamana bağlı denklemi bulunabilir:

$$r(t) = x(t)i + y(t)j \quad (9)$$

$$r(0) = x(0)i + y(0)j = 2i ; (x(0), y(0)) = (2,0) \quad (10)$$

$$r(1) = x(1)i + y(1)j = 2j ; (x(1), y(1)) = (0,2) \quad (11)$$

$$v(0) = x(0)i + y(0)j = 0 \quad (12)$$

$$v(1) = x(1)i + y(1)j = 0 \quad (13)$$

$$x(t) = a \sin^2 b(c-t) - \frac{1}{2} a (1 - \cos 2b(c-t)) \quad (14)$$

Yukarıdaki pozisyon ve hız bilgilerine göre  $a=2$ ;  $b=\pi/2$ ;  $c=1$  olarak hesaplanarak  $x(t)$  ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$x(t) = 1 - \cos \pi (1-t) = 2 \sin^2 \frac{\pi}{2(1-t)} \quad (15)$$

$y(t)=f(x(t))$  ifadesine göre (15) denklemi ile bulunan  $x(t)$  ifadesi (8) deki  $y(t)$  yerine konarak  $y(t)$  yörünge fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$y(t) = -4 \cdot \sin^4 \frac{\pi}{2(1-t)} + 2 \cdot \sin^2 \frac{\pi}{2(1-t)} + 2 \quad (16)$$

Zamana bağlı polar koordinatlarda eğri denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

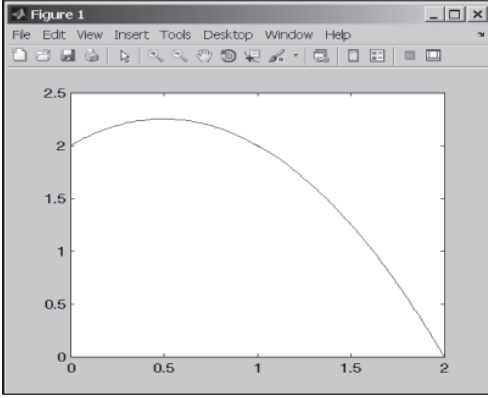
$$r(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (17)$$

$$\theta = \arctan \left( \frac{y(t)}{x(t)} \right) = \arctan \left[ -2 \sin^2 \frac{\pi}{2} (1-t) + 1 + \operatorname{cosec}^2 \frac{\pi}{2} (1-t) \right] \quad (18)$$

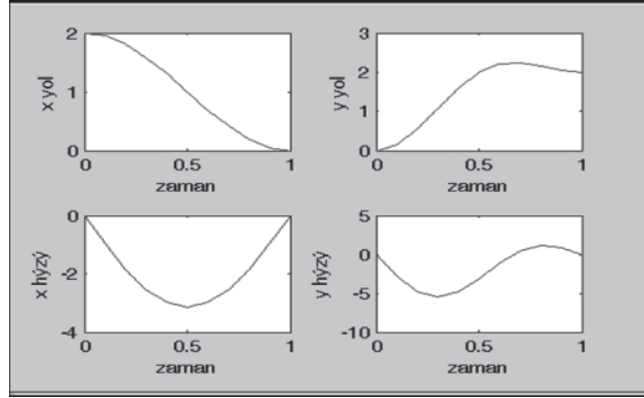
## 6. SONUÇLAR

Yukarıda sınır şartları olarak yörünge noktaları ve bu noktalardaki hızları verilerek  $x(t)$  ve  $y(t)$  fonksiyonları hesaplanan örnek yörünge noktasının Matlab ile çizdirilen eğrisi Şekil 14'te görülmektedir. Aynı fonksiyonların mevcut manipülatöre  $r(t)$  ve  $\theta(t)$  fonksiyonları olarak verilmesi ile de düzlemsel şekil çizdirilebilir. Örnekte belirtilen yörünge noktaları ve bu noktalardaki hızlar verilerek saptanan  $x(t)$  ve  $y(t)$  fonksiyonlarına göre  $V_x(t)$  ve  $V_y(t)$  hız eğrilerinin hesaplanmış zamana bağlı eğrileri de Şekil 15'te verilmiştir. Bu eğriler esas alınarak çok hassas yörünge takibi yapılması mümkün olmaktadır.

Aşağıda bu eğrilerin Matlab ortamında çıktısı verilmiştir.



Şekil 14. Yörünge eğrisi

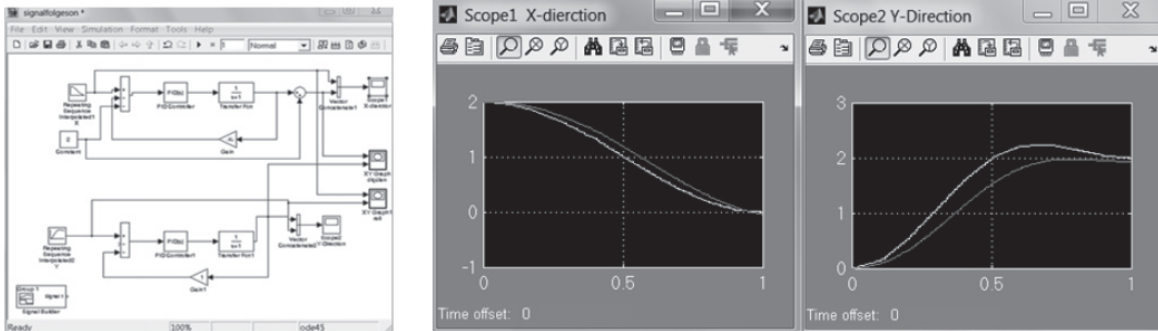


Şekil 15. Hız eğrileri

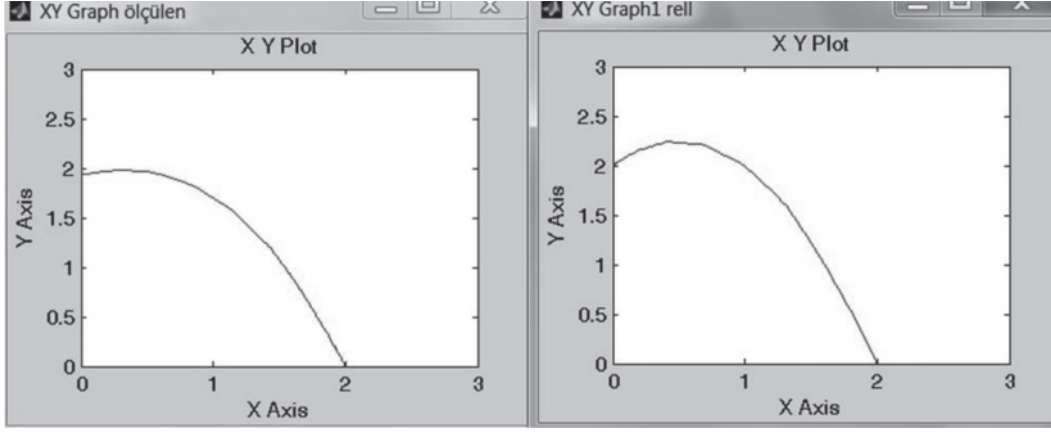
## 5. Kontrol Simulasyonu ve Sonuçlar

Tasarımı yapılan ve yörünge hareketi belirlenen robotun Şekil.16 da görülen Matlab Simulink kontrol devresi oluşturularak analizi yapılmıştır. Yukarıda verilen teorik yörünge eğrisinden alınan  $X(t)$  ve  $Y(t)$  koordinat noktaları referans olarak verilerek kontrol devresi çıktısı olarak önce  $x(t)$  sonra da  $Y(t)$  eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğrilerden her iki durumda da sistem gecikmesinden kaynaklanan hataya rağmen referans eğrilerin yeterli hassasiyette takibi sağlanmıştır. En son olarak ta kontrol devresi çıktıları olarak  $Y(t)=f(x(t))$  grafiği çizdirilerek gerçek yörünge eğrisinden hatası ortaya konmuştur. Gerçek model üzerinde  $X(t)$  ve  $Y(t)$  değerlerinden hesaplanan  $r$  ve  $\Theta$  koordinatları referans verilerek yapılan reel testlerden de simülasyona çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

## 6. Kontrol Simulasyonu ve Eğrileri



Şekil 16. Matlab Kontrol Simulasyonu ve  $x(t)$  – $Y(t)$  grafikleri



Şekil 17. Hesaplanmış referans(reel) ve kontrol devresi (ölçülen) çıktıları

## KAYNAKLAR

- [1] UYAR, E., AKÇAY, M. E., VAROL, N. E., “Cam Temizleme Robotu Tasarımı Ve İmalatı”, III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, İzmir, Aralık 2005.
- [2] FESTO DIDACTIC, “Elektro-Pneumatikund Lernsystem Automatisierungstechnik”
- [3] ANTALOCZY, T., “Windoro Window Cleaning Robot”, referans kaynağı: [http://robotbg.com/reviews/windoro\\_window\\_cleaning\\_robot\\_review](http://robotbg.com/reviews/windoro_window_cleaning_robot_review), kullanım tarihi: 2013-06-27.
- [4] “Vacuum Technology”, Festo Sistem Kataloğu, Festo San. ve Tic. A.Ş.
- [5] “FST4.10 PLC Programming Guide and Software”, Festo San. ve Tic. A.Ş..
- [6] “FESTO Product Catalogue 2008”, Festo San. ve Tic. A.Ş..
- [7] “Micro-cleaning”, Wanders GmbH Dorfstr. 12, 79256 Buchenbach, Almanya.

## ÖZGEÇMİŞ

### Erol UYAR

1945 yılı İzmir doğumludur. 1970 yılında Stuttgart Teknik Üniversitesi Makina Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimini bitirmiştir. Ege Üniversitesi Makine Müh. Bölümünde 1976’da doktora programını bitirmiştir. Daha sonrasında akademik kariyerine Dokuz Eylül Üniversitesi ve Ege Üniversitesinde devam etmiş olmakla birlikte, 2011 yılında Dokuz Eylül Üniversitesinden Profesör ünvanı ile emekli olmuştur. Şu anda Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bölümünde faaliyetlerini sürdürmektedir.

### Mücahid CANDAN

1989 yılı doğumludur. 2011 yılında Uludağ Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2011 yılından beri Ege Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Devreler ve Sistemler Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.

**Ekrem YAVUZ**

1990 yılı doğumludur. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2012 yılından beri aynı zamanda araştırma görevlisi olarak çalıştığı Ege Üniversitesi Mekatronik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.

**Nail AKÇURA**

1989 yılı doğumludur. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümünü bitirmiştir. 2012 yılından beri aynı zamanda araştırma görevlisi olarak çalıştığı Ege Üniversitesi Mekatronik Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini sürdürmektedir.